レーザースキャナを用いた平面計測における誤差分布モデルの構築

高知工科大学　○宮崎　倫理　坂井　知也　JEONG Jong Hyeok　高木　方隆

1. 背景

1.1. 計測目標

地すべりは、地形的・地質的特性ならびに、降雨・融雪といった自然要因、あるいは人為的な環境の変化を伴う人為的な要因、または、その両要因が付加された時点で、降雨・融雪といった自然要因を直接あるいは間接の誘因として発生する。また地すべりは、これらの要因により力学的バランスが破壊され、地中に発生した破壊面を境としてそれよりも上側に存在する斜面構成物質が重力の作用により連続的または間接的に比較的緩慢な速度(0.01～10mm/day 程度)で広範囲(1～100ha)にわたり土塊が移動する現象のことを言う。

現在、主に用いられている地すべり変位観測システムには、GPS 測量・孔内傾斜計・地盤伸縮計などがある。これらの変位観測システムは、地すべり地内において直接変位量を測定するため、精度が高いと考えられる。しかし、これらの変位観測システムは、点での計測であるため、地すべり地全体の挙動を把握することができない。災害を未然に防ぐため、或いは、災害における被害を最小限に食い止めるためにも地すべり地全体の挙動把握を行う必要がある。

1.2. レーザースキャナにおける高精度データ取得の問題点

近年、地上型レーザースキャナは、短時間に高速高密度、広範囲のデータを取得可能なため、有用な計測技術として注目されている。したがって、防災、高密度 3D 地形観測、遺跡・文化財調査などさまざまな分野で有効利用がなされている。

レーザースキャナは地上において使用することを目的としたスキャナタイプのレーザーセンサであり、ノンプリズムタイプの光波測距儀の一種である。レーザースキャナは、写真を撮るように、一般的な単点タイプの光波測距儀よりも、高速高密度に位置情報を取得することが可能である。使用したレーザースキャナのスキャニング性能を表-1 に示す。

表-1　LMS-Z210 距離計測器性能

項目	詳細
計測距離範囲	≦350m(反射率≧80%の自然物)
計測距離範囲	≦150m(反射率≧10%の自然物)
最短距離	2m
計測精度	2.5cm（平均二乗誤差）
レーザー波長	0.9μm(近赤外線)

1.2.1. 取得データ誤差の問題

図-1 は、レーザースキャナと対象物との距離が、10m のときのデータ取得例を表し、図-2 は 20m、図-3 は 30m のときのデータ取得例を示している。また、これらの表現には、TIN と呼ばれる DSM を採用した。TIN とは、Triangulated Irregular Network Model の略で、不正三角網モデルの意味である。また、DSM とは、Digital surface model の略で、ビルや家屋の高さ情報を含めた数値表層モデルを意味する。問題点は、レーザースキャナを用いて近距離に設置させた平坦な表面を持つ対象物に対して計測を行っても、その表面には凹凸が存在することである。この問題については、距離計測精度（2.5cm）が由来してい

ると考えられる。

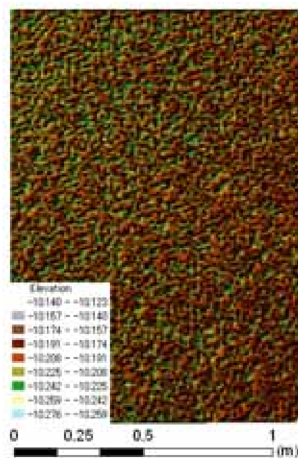


図-1　10m の時のデータ取得例

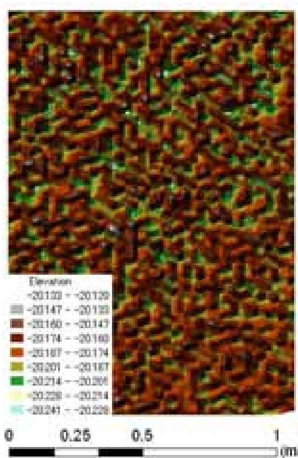


図-2　20m の時のデータ取得

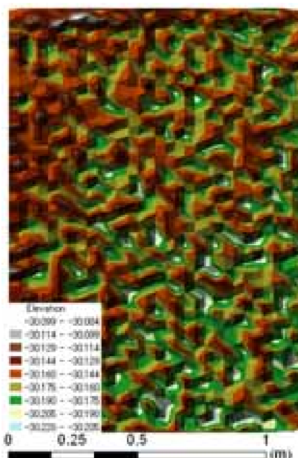


図-3　30m の時のデータ取得

1.2.2.　**セッティング再現性の問題**

通常、地すべりのような緩慢な移動現象に対して、その変位を抽出しようとする場合、多時期により取得された三次元データの比較を行うことによって、その変位を抽出する。点と点との比較を行うためには、レーザースキャナ本体のセッティング位置を再現する必要がある。

xy 軸方向（水平方向）については、測量用器具を整準するための整準台を使用することにより高精度な再現が可能である。しかし、z 軸方向（鉛直方向）については、整準するための器具が存在しないため再現することが非常に困難である。

また、視準する望遠鏡等が存在しないため、スキャニング開始位置を設定することができない。したがって、レーザースキャナを据え置かない限り同一点の観測はできない。そのため、レーザースキャナから得られる点と点との比較では、地滑りのような緩慢な移動現象をとらえることは非常に困難である。

1.2.3.　**基準点取得における問題**

レーザースキャナのセッティングを再現することができない場合、多時期データを用いた位置情報の比較を行うことができない。レーザースキャナは独自の座標系（レーザー座標）を持っていることから、絶対座標への変換が必要とされる。座標変換を行うためには、あらかじめ現地にプリズムや反射板を設置し、GPS・トータルステーションを用いて、その絶対座標を精密に計測しておく。その後、レーザースキャナでプリズム、反射板を含めた対象地域のデータを取得する。この時、レーザースキャナにより取得されるデータは、レーザー座標系である。座標変換時に必要なレーザースキャナにより取得されるプリズムのレーザー座標は、レーザースキャナ付属のアプリケーションを用いて反射強度により自動抽出される。レーザー座標と絶対座標を求めた後、三次元アフィン変換により座標

変換を行う。しかし、自動抽出されたレーザー座標が、正確にプリズムの中心を取得しているとは限らない。そのため高精度の座標変換が困難である。

2. 目的

本研究では、取得データ誤差の問題にのみ着目し、本研究における要求精度を標準偏差で 1cm 未満とする。

本研究では、レーザースキャナによる取得データの精度を向上させるために、平面計測法を提案する。レーザースキャナによって取得された各点データには、ランダムなノイズが存在すると推測される。このランダムなノイズを減少させるためには、平面計測により誤差を平均化する方法が効果的であると考えられる。この平面計測法を用いることにより算出される誤差を推測する誤差分布モデルを構築する。

3. 平面計測による取得データ誤差の低減策

3.1. 誤差分布モデルの構築

3.1.1. 仮定する誤差分布モデル

レーザースキャナを用いて計測を行うにあたって、複数回計測により取得されたデータが、同一ベクトル上に存在し、偶然誤差だけが含まれると仮定した場合について考えてみる。この一点に対して、複数回データ取得を行い、最小二乗法を用いることによって最確値、あるいは標準偏差を求めることができる。また、データの取得回数を増やすことにより、平均値の標準偏差は次第に小さくなると考えられる。一般的に、誤差量（計測値の標準偏差）σ_0と取得データ数 n の平方根との間には反比例の関係があり、次の式(式-1)で表すことが出来る。

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad \cdots \text{式-1}$$

σ_0 ： 誤差量（計測値の標準偏差）
σ ： 計測精度の標準偏差
n ： 取得データ数

実際に、レーザースキャナを用いた計測を行う場合、レーザースキャナによって取得されたデータが、同一ベクトル上に存在する状況は極まれである。これは、レーザースキャナに視準する望遠鏡が存在しないことにより、スキャニング開始位置を制御できないことが問題であると考えられる。したがって、平面計測法を適応することが好ましいと考えられる。

平面計測法は、まず、平坦な対象物に対して、レーザースキャナを用いてデータ取得を行う。得られたデータに対して最小二乗法を用いることによって平面の式(式-2)を解き、最確値を算出するという流れで行う。

$$ax + by + cz = 1 \qquad \cdots \text{式-2}$$

x, y, z：取得データの三次元座標
a, b, c：係数

平面計測を行う場合、重要となってくるのは、計測平面の一辺の長さである。計測平面の一辺の長さが短くなれば、回帰直線の傾きは大きくなり、長くなれば、回帰直線の傾きは小さくなる。すなわち、計測平面の一辺の長さと誤差量との間にも反比例の関係が成り立つと考えられる（式-3）。

$$\sigma_0 = \frac{P\sigma}{r\sqrt{n}} \qquad \cdots \text{式-3}$$

σ_0： 誤差量
σ ： 計測精度の標準偏差
n ： 取得データ数
P ： 未知係数
r ： 計測平面の一辺の長さ

3.1.2. シミュレーションによるモデル式の調整

3.1.2.1. シミュレーションデータの作成

推測される誤差分布モデルの未知係数Pを調整し導くためにレーザースキャナによりデータが取得された状態をシミュレートした。シミュレーションデータを作成するにあたって、計測精度の標準偏差、角度分解能、計測平面の一辺の長さ、また、レーザースキャナと対象物との距離といった余条件を設定しなければならない。したがって、角度分解能は、実際に使用しているレーザースキャナの角度分解能（0.072°）を使用した。また、レーザースキャナと対象物との距離については、約 3m とした。

3.1.2.2. モデル式の調整手法

未知係数”P”を決定するために、式-3 により表された関係を利用した。関係とは、誤差量 σ_0 の値と、計測平面の一辺の長さ r と取得データ数 n との平方根が、反比例するという関係である。この関係を用いて、シミュレーションによって得られた誤差量と計測平面の一辺の長さと取得データ数 n から未知係数 P の算出を試みた。しかし、平面計測に使用した点数が 4 点や 8 点といった計測平面の一辺の長さが短いものは、誤差量 σ_0 の値が大きく、未知係数”P”の値が大きく乱れてしまった。すなわち、誤差量が一定でないために最小二乗法の適応が困難であったといえる。したがって、目視により未知係数 P を 0.05 間隔で変化させ、最適値の決定を試みた。図-4 は、計測精度の標準偏差 11 種類から算出される係数 P の値について表したものである。

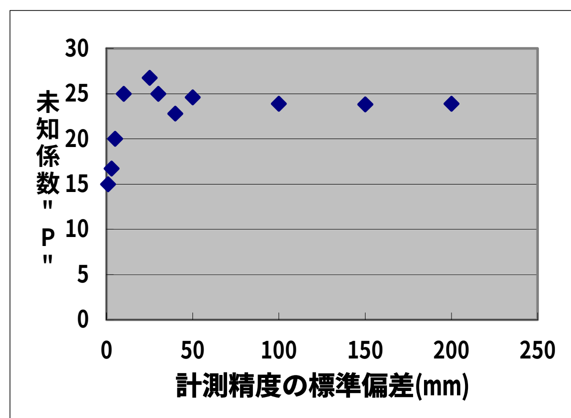


図-4 計測精度の標準偏差と未知係数 P の関係

図-4 より、最終的な P の値には、計測精度の標準偏差 11 通りから得られた係数 P は、ほぼ一定の値をとると考えられるので平均値を使用することとした。算出され、実際に使用した平均値は、22.5 であった。得られた P の値を用いて、誤差分布モデルとシミュレーションデータによる誤差量の平均値との関係について図-5 に示す。

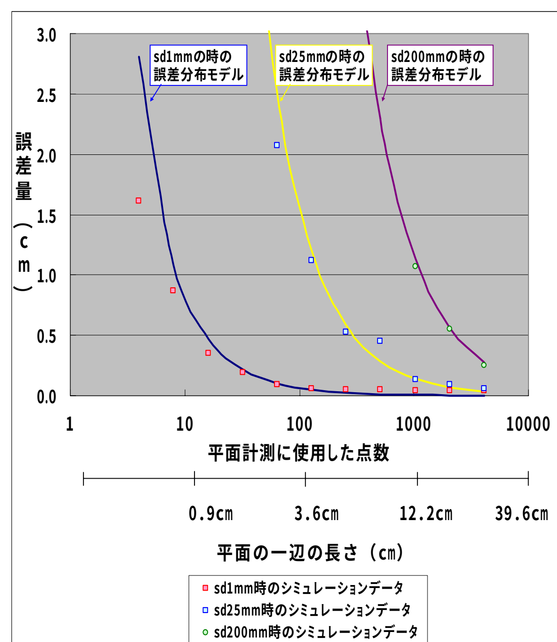


図-5 係数 P 調整後の誤差分布モデルによる推定誤差量と 100 回のシミュレーションデータによる誤差量の平均値との比較

図-5 より、係数 P 調整後の誤差分布モデル

による推定誤差量と 100 回のシミュレーションデータによる誤差量の平均値とがほぼ同一曲線であると考えることができる。

3.2. 誤差分布モデルに基づく平面計測の有効性

3.2.1. 平面の面積と誤差との関係

係数 P を決定し、調整された誤差分布モデルにより算出される、点の密度が一定であるときの各平面計測に使用した点数（計測平面の一辺の長さ）と誤差量との関係を表した（図-7）。また、角度分解能は一定としているため、その密度は、レーザースキャナのスペックとした。

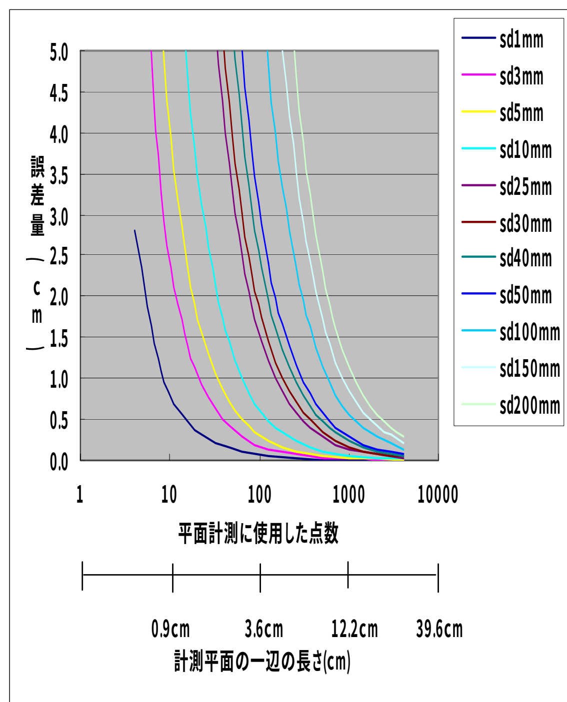


図-6　調整された誤差分布モデルによる各平面計測に使用した点数と誤差量との関係

図-6 より、現在使用しているレーザースキャナと同等の精度である標準偏差 25mm を用いた場合、1 回のスキャニングで要求精度とした 1cm 未満を満足させるためには、約 250 点以上の点数が必要であることがわかる。

4. 室内実験における平面計測

4.1. データ取得

作成したモデル式が妥当性を求めるために、幅 1.2m、高さ 1.7m の大きさの平坦な表面を持つボードを用意し、実際にレーザースキャナを用いてデータ　取得を行った。以後、この用意したボードを計測ボードとする。この計測ボードに対し、シミュレーションデータ作成時同様、レーザースキャナとの距離が約 3m の状態で 100 回の計測を行った。このとき、レーザースキャナと対象とした平面の設置状況には一切の変化を与えていない。

4.2. 室内実験における誤差算出のための検証データの作成

検証用平面は、設置したボード中心部分の 125 点×125 点の範囲から 15,625 点取得した。さらにこの 15,625 点について 100 回の計測により取得されたデータを統合する事で、計 1,562,500 点を取得することができた。この 1,562,500 点の統合されたデータを統合データとする。検証用平面は、統合データの三次元座標について最小二乗法を用いて解き、これを検証用平面とした。検証用平面と統合データとの間の距離（誤差量）についてヒストグラムを作成した（図-7）。また、ヒストグラムとこのヒストグラムから得られた標準偏差の値より得られる正規分布も重ね合わせた。

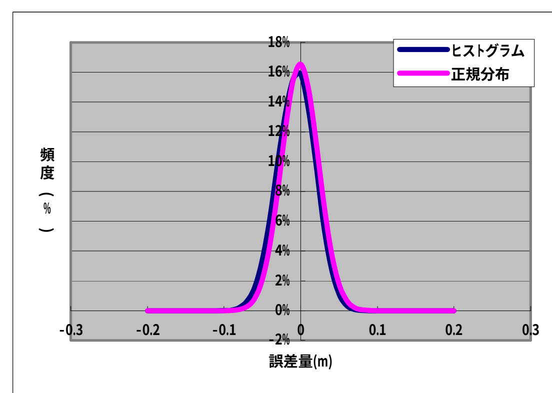


図-7 誤差のヒストグラムとその正規分布

誤差量がほぼ正規分布に近いことから、計測精度に影響していたものが、ランダムなノイズによるものであることを証明することができた。

4.3. 平面の面積と誤差との関係

平面計測に使用した点数は、100 回分の取得データについて 4 点から～4096 点までとし、これらの点数について計 11 通りの平面を導いた。図-8 は、平面計測結果 100 回の平均と標準偏差 25mm 時の誤差分布モデルによる平面を作成する際使用した点数と誤差量との関係について示したものである。

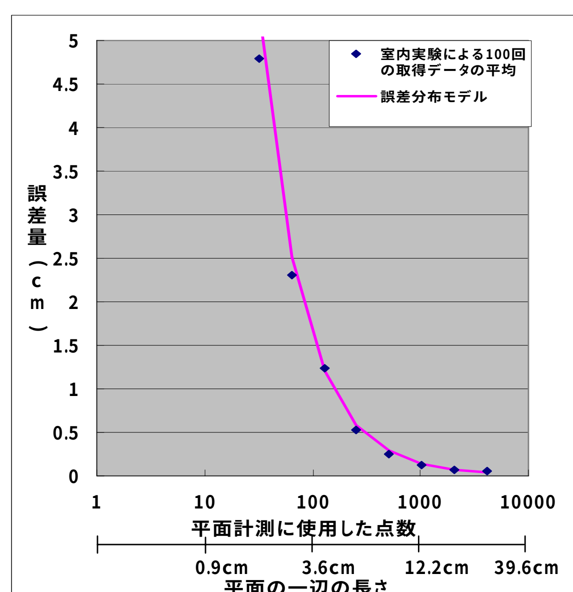


図-8 室内実験による 100 回の取得データの平均と誤差分布モデルの比較

図-8 より、誤差分布モデルから得られた結果と平面計測結果が、平面計測に使用した点数約 250 点(約 6cm)以上を必要としており、両者結果が一致することから誤差分布モデルを検証することが出来た。

5. 考察

本研究の目的である、レーザースキャナを用いた平面計測による誤差分布モデルを構築することができた。誤差分布モデルを構築できたことで、平面計測の有用性が高いことを証明され、室内実験を用いた計測結果より取得データ誤差の問題がランダムなノイズによるものであることを証明することができた。また、要求精度を満たすために必要な平面計測に使用した点数やデータ取得回数を推定することができた。

今後、本研究結果を、長者地すべり地へと適応していかなければならない。対象としている護岸ブロックの平面からレーザースキャナを用いた一度の計測により約 100 点取得することができる。したがって、本研究での要求精度である 1cm 未満を満たすためには、平面計測に使用した点数、64 点時の結果が適応できる。要求精度を満たすために必要な総点数約 500 点が必要であり、計測回数にして約 8 回が必要であるといえる。

しかし、本研究では、レーザースキャナと対象物との距離を約 3m と非常に近距離にある状態を想定して行われた。実際、対象となる護岸ブロック平面までの距離が、約 50m である。したがって、計測精度に影響しているランダムなノイズによる誤差量が計測対象との距離に関係なく一定であるかについて検討する必要がある。もし、ランダムノイズによる誤差量が一定であれば、本研究により推定された誤差分布モデルによる長者地すべり地適応について検討していく予定である。

6. 参考文献

1) 丸安 隆和、「新版 測量学(上)」コロナ社
2) 藤原明敏、「地すべりの解析と防止対策」、[80-81P]
3) 高知県土木部防災砂防課、「長者地すべり」
4) リーグルジャパン株式会社、「LMZ-Z210 取扱説明書」
5) 日本リモートセンシング研究会「改訂版 図解リモートセンシング」社団法人日本測量協会